



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

**ΕΝΟΤΗΤΑ 10:
Βιομάζα**

ΑΣΚΗΣΗ 1

Να υπολογισθεί η ΑΘΔ και η ΚΘΔ της τυπικής βιομάζας. Η τυπική βιομάζα περιέχει 10 % κ.β. υγρασία, 5 % κ.β. τέφρα και 85 % κ.β. ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα. Η ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα τυπικά περιέχει 50 % κ.β. άνθρακα, 44 % κ.β. οξυγόνο και 6 % κ.β. υδρογόνο.

ΛΥΣΗ

Η ΑΘΔ της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας είναι:

$$A\Theta\Delta = 33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,06 - 0,44/8) = 17.666 \text{ kJ/kg ξηρής βιομάζας}$$

Οπότε, η συγκεκριμένη βιομάζα έχει ΑΘΔ:

$$0,85 \text{ kg ξηρής βιομάζας/kg βιομάζας} \times 17.666 \text{ kJ/kg ξηρής βιομάζας} = 15.016 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

Η Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη (ΚΘΔ) της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας υπολογίζεται από την ΑΘΔ αφαιρώντας τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού που παράγεται από την καύση (ο ατμός όταν υγροποιείται αποδίδει θερμότητα 40,7 kJ/mole ατμού).

Το 1 kg βιομάζας (υγρή) περιέχει:

10 % υγρασία ή 100 γρ νερού ή $100/18 = 5,5$ mol νερού (18 gr/mol το ΜΒ του νερού)
και 850 γρ ξ. βιομάζας x 6% κβ υδρογόνο = 51 γρ ατομικού υδρογόνου ή $51/2 = 25,5$
mol H_2

τα οποία κατά την καύση τους ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons H_2O$) παράγουν 25,5 mol νερού. Τα
συνολικά mol ατμού που προκύπτουν μετά την καύση 1 kg βιομάζας είναι:

5,5 mol από την εξάτμιση της υγρασίας της βιομάζας και 25,5 mol από την καύση του
υδρογόνου της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας

Έτσι, η ΚΘΔ της συγκεκριμένης βιομάζας είναι:

$$\begin{aligned} \text{ΚΘΔ} &= 15.016 \text{kJ/kgβιομάζας} - 31 \text{mol } H_2O/\text{kgβιομάζας} \times 40,7 \text{kJ/mol } H_2O \\ &= 13.754 \text{ kJ/kgβιομάζας} \end{aligned}$$

ΑΣΚΗΣΗ 2

Να υπολογισθεί η θερμότητα σχηματισμού του οργανικού μέρους (της ξηρής και
ελεύθερης τέφρας – ξ. βιομάζας) της τυπικής βιομάζας. Δίνονται η ενθαλπία
σχηματισμού του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού 393,5 και 285,8 kJ/mol
αντίστοιχα.

ΛΥΣΗ

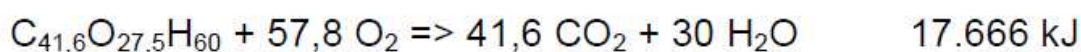
Η τυπική ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα περιέχει 50 % κ.β. άνθρακα, 44 % κ.β.
οξυγόνο και 6 % κ.β. υδρογόνο. Η ΑΘΔ της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας
είναι:

$$\text{ΑΘΔ} = 33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,06 - 0,44/8) = 17.666 \text{ kJ/kg } \xi. \text{ βιομάζας}$$

Η ΑΘΔ είναι ίση με τη θερμότητα που εκλύεται κατά την πλήρη καύση 1 kg ξ.
βιομάζας. 1 kg ξ. βιομάζας περιέχει:

500 gr C	ή	41,6 mol C
440 gr O	ή	27,5 mol O
60 gr H	ή	60 mol H

Οπότε η αντίδραση καύσης 1 kg ξ. βιομάζας μπορεί να γραφτεί ως εξής:



Η θερμότητα που εκλύεται από την παραπάνω αντίδραση είναι:

$$17.666 = 41,6 \Delta H_{CO_2} + 30 \Delta H_{H_2O} - \Delta H_{\xi.βιομάζας}$$

$$\text{και } \Delta H_{\xi.βιομάζας} = 41,6 \cdot 393,5 + 30 \cdot 285,8 - 17.666 = 7.277,6 \text{ kJ/kg.}$$

ΑΣΚΗΣΗ 3

Σε καυστήρα ρευστοστερεάς κλίνης εισέρχονται υπολείμματα κοπής ξύλου με στοιχειακή σύσταση:

C	36	
H	4	
O	32	
H ₂ O	25	
στάχτη	3	% kg/kg

και με ρυθμό 1 kg/s. Τα απαέρια εξέρχονται σε θερμοκρασία 150 °C και περιέχουν 1 % CO. Θεωρώντας 25 % περίσσεια αέρα, στην τροφοδοσία, να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμότητα και η απόδοση του καυστήρα ως προς την ΑΘΔ και την ΚΘΔ της τροφοδοσίας.

ΛΥΣΗ

Ισοζύγιο Θερμότητας: θερμότητα που παράγεται = ωφέλιμη + λανθάνουσα + απώλειες κατά την καύση.

Η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά της ενθαλπίας των προϊόντων της αντίδρασης μείον την ενθαλπία των αντιδρώντων (βιομάζα και αέρας). Για το λόγο αυτό αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η ενθαλπία σχηματισμού της βιομάζας από την Α.Θ.Δ. της:

$$A\Theta\Delta = 33.890,4 \times C + 144.180,6 \times \left(H - \frac{O}{8}\right) \text{ kJ/kg}$$

Η στοιχειακή σύσταση της ξηρής βιομάζας είναι:

$$C : 36 / (36 + 4 + 32) = 36 / 72 = 0,500 \text{ ή } 50,0 \%$$

$$H : 4 / 72 = 0,055 \text{ ή } 5,5 \%$$

$$O : 32 / 72 = 0,444 \text{ ή } 44,4 \% \text{ κ.β.}$$

Οπότε η θερμογόνος δύναμη της ξηρής πρώτης ύλης είναι:

$$33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,055 - 0,444/8) = 16.873 \text{ kJ/kg}$$

1 kg ξηρής βιομάζας περιέχει:

- 500 gr C ή 41,6 mol C
- 55 gr H ή 55 mol H και
- 444 gr O ή 27,8 mol O

Οπότε η στοιχειομετρία της αντίδρασης πλήρους καύσης, στη βάση του 1 kg ξηρής βιομάζας, είναι:



και το ισοζύγιο ενέργειας είναι: $16.873 = 41,6 \times 393,5 + 27,5 \times 285,8 - \Delta H_{\text{βιομάζας}}$

Οπότε: $\Delta H_{\text{βιομάζας}} = 41,6 \times 393,5 + 27,5 \times 285,8 - 16.873 = 7.356,1 \text{ kJ/kg}$

Για να υπολογιστεί η σύσταση των απαερίων, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η περίσσεια αέρα που χρησιμοποιείται. Ο στοιχειομετρικός αέρας που απαιτείται για πλήρη καύση, στη βάση 1 sec (1 kg τροφοδοσίας ή 720 gr ξηρής βιομάζας), υπολογίζεται ως εξής:

τα 720 gr ξηρής βιομάζας περιέχουν:

- 360 gr C ή 30 mol C
- 40 gr H ή 40 mol H και
- 320 gr O ή 20 mol O

οπότε, η στοιχειομετρία της πλήρους καύσης είναι:



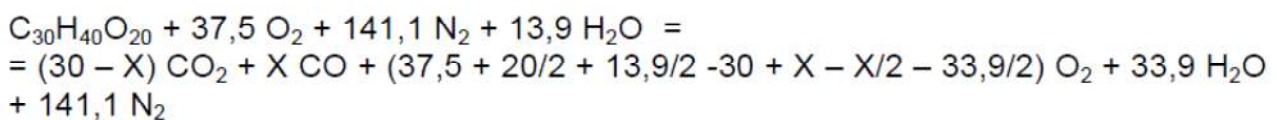
και το θεωρητικό O_2 που απαιτείται είναι 30 mol / sec. Η αντίστοιχη ποσότητα αέρα είναι:

$$30 \text{ mol O}_2 + 79/21 \times 30 \text{ mol N}_2 = 142,9 \text{ mol}$$

Για 25 % περίσσεια αέρα η συνολική ποσότητα αέρα που τροφοδοτείται είναι:

$$(1 + 0,25) \times 142,9 = 178,6 \text{ mol}$$

Με βάση τα παραπάνω, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στον καυστήρα (στη βάση 1 sec) είναι:



Οπότε τα συνολικά mol στην έξοδο είναι:

$$30 - X + X + 7,5 + X/2 + 33,9 + 141,1 = 212,5 + X/2$$

το 1 % των οποίων είναι CO, δηλαδή:

$$X = 0,01 (212,5 + X/2) \Leftrightarrow X = 2,14$$

Οπότε η έξοδος αποτελείται από 27,86 mol CO₂, 2,14 mol CO, 8,57 mol O₂, 33,9 mol H₂O και 141,1 mol N₂. Η θερμότητα που παράγεται από την αντίδραση (στη βάση 1 sec και σε πρότυπες συνθήκες) είναι:

$$\begin{aligned} & 27,86 \times \Delta H_{\text{CO}_2} + 2,14 \times \Delta H_{\text{CO}} + 20 \times \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{\text{βιομάζας}} = \\ & = 27,86 \times 393,5 + 2,14 \times 110,5 + 20 \times 285,8 - 5.296,3 = \\ & = 11.619,0 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο} \end{aligned}$$

Η θερμότητα που απομακρύνεται με τα απαέρια είναι (λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους δύο πρώτους όρους των εξισώσεων της θερμοχωρητικότητας):

$$\begin{aligned} & = 27,86 \times [0,043 \times (423 - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (423^2 - 298^2)] + \\ & + 2,14 \times [0,028 \times (423 - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] + \\ & + 33,9 \times [0,034 \times (423 - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (423^2 - 298^2)] + \\ & + 8,57 \times [0,035 \times (423 - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] + \\ & + 141,1 \times [0,027 \times (423 - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] = \\ & = 27,86 \times (5,38 + 0,52) + 2,14 \times (3,5 + 0,23) + 33,9 \times (4,25 + 0,03) + 8,57 \times (4,38 + \\ & 0,05) + 141,1 \times (3,38 + 0,19) = 164,4 + 8,0 + 145,1 + 38,0 + 503,7 = 859,2 \text{ kJ/kg} \\ & \text{βιομάζας στην είσοδο,} \end{aligned}$$

και η λανθάνουσα θερμότητα είναι:

$$33,9 \times 40,7 = 1.379,7 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο.}$$

Οπότε η ωφέλιμη θερμότητα είναι:

$$11.619,4 - 859,2 - 1.379,7 = 9380,5 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο}$$

Η Α.Θ.Δ. της βιομάζας που εισέρχεται στον καυστήρα σε 1 sec, είναι:

$$16.873,0 \times 0,72 = 12.148,6 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

και η αντίστοιχη Κ.Θ.Δ.: $12.148,6 - 33,9 \times 40,7 = 10.768,9 \text{ kJ/kg βιομάζας}$

οπότε η απόδοση του καυστήρα, είναι: $n_{th} = 9.380,5/12.148,6 = 77,2 \%$ της Α.Θ.Δ της τροφοδοσίας και $n_{th} = 9.380,5/10.768,9 = 87,1 \%$ της Κ.Θ.Δ της τροφοδοσίας.

ΑΣΚΗΣΗ 4

Στο προηγούμενο παράδειγμα να υπολογιστεί η θερμοκρασία καύσης (η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να εξέλθει ο ατμός από το λέβητα.

ΛΥΣΗ

Η θερμοκρασία καύσης υπολογίζεται από το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ της εισόδου του καυστήρα και της εξόδου του (δηλαδή πριν τα απαέρια αποδώσουν οποιαδήποτε θερμότητα στο νερό του εναλλάκτη του λέβητα):

Ισοζύγιο Θερμότητας: θερμότητα που = ωφέλιμη + λανθάνουσα παράγεται θερμότητα κατά την καύση.

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση είναι 11.619,0 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα είναι 1.379,7 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο. Η ωφέλιμη θερμότητα στην περίπτωση αυτή είναι η αισθητή θερμότητα που περιέχουν τα απαέρια, πριν αυτά ψυχθούν στον εναλλάκτη του λέβητα, και με βάση το παραπάνω ισοζύγιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{ωφέλιμη θερμότητα} = 11.619,0 - 1.379,7 \Leftrightarrow 27,86 \times [0,043 \times (T - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (T^2 - 298^2)] +$$

$$+ 2,14 \times [0,028 \times (T - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 33,9 \times [0,034 \times (T - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 8,57 \times [0,035 \times (T - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 141,1 \times [0,027 \times (T - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] = 10.239,3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times (T - 298) + 16,0 \times 10^{-5} \times (T^2 - 88804) + \\ + 0,059 \times (T - 298) + 5,37 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) + \\ + 1,15 \times (T - 298) + 106,4 \times 10^{-7} \times (T^2 - 88804) + \\ + 0,30 \times (T - 298) + 4,63 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) + \\ + 3,81 \times (T - 298) + 294,9 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) = 10.239,3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times T - 357,6 + 16,0 \times 10^{-5} \times T^2 - 14,2 + \\ + 0,059 \times T - 17,58 + 5,37 \times 10^{-6} \times T^2 - 0,48 + \\ + 1,15 \times T - 342,7 + 106,4 \times 10^{-7} \times T^2 - 0,94 + \\ + 0,30 \times T - 89,4 + 4,63 \times 10^{-6} \times T^2 - 0,41 + \\ + 3,81 \times T - 1135,4 + 294,9 \times 10^{-6} \times T^2 - 26,2 = 10.239,3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 47,55 \times 10^{-5} \times T^2 + 6,52 \times T - 1984,9 = 10.239,3 \Leftrightarrow 47,55 \times 10^{-5} \times T^2 + 6,52 \times T - 12.224,2$$

$$T = (-6,52 \pm (6,52^2 + 4 \times 47,55 \times 10^{-5} \times 12.224,2)^{1/2}) / (2 \times 47,55 \times 10^{-5}) = 1671,2 \text{ K} = 1398,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ΑΣΚΗΣΗ 5

Ο καυστήρας του προηγούμενου παραδείγματος χρησιμοποιείται για την υπερθέρμανση ατμού στους 600 °C και την τροφοδοσία του σε ατμοστρόβιλο. Να υπολογιστεί η ονομαστική ισχύς και η απόδοση της διάταξης καυστήρα – ατμοστροβίλου, αν η πίεση λειτουργίας του τελευταίου είναι 30 MPa και η απόρριψη θερμότητας γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C. Η απόδοση της αντλίας και του στροβίλου θεωρούνται ίσες με 85 % και το κλάσμα ατμού μετά τον στρόβιλο 90 %.

ΛΥΣΗ

Η θερμότητα που αποδίδεται στον κύκλο Rankine είναι 9380,5 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο ή 9380,5 kJ/sec, αφού η τροφοδοσία του καυστήρα είναι 1 kg βιομάζας / sec. Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για να παράγει υπέρθερμο ατμό σε $T_3 = 600$ °C και $P_3 = 30$ MPa, από συμπιεσμένο νερό σε θερμοκρασία $T_2 = 40$ °C και $P_2 = 30$ MPa.

Η ενθαλπία του νερού στην κατάσταση 2 είναι 193,89 kJ/kg και η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 είναι 3443,9 kJ/kg. Οπότε η μαζική παροχή

νερού/ατμού μέσω του λέβητα (και όλου του κύκλου Rankine) είναι:

$$M_{H_2O} = \frac{9380,5 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}}{(3443,9 - 193,89) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Το ηλεκτρικό έργο που αποδίδει ο στρόβιλος του κύκλου Rankine είναι:

$$W_{out} = \eta_{\sigma} \times M_{H_2O} \times (H_3 - H_4) = 0,85 \times 2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (3443,9 - 2333,6) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2718,0 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

όπου H_3 η ειδική ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 και H_4 η ειδική ενθαλπία του μίγματος κορεσμένου ατμού (90 %) και υγρού (10 %) στην κατάσταση 4:

$$H4 = 0,9 \times 2574,3 + 0,1 \times 167,57 = 2333,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Αντίστοιχα, το έργο που προσδίδει η αντλία στο κύκλο είναι:

$$W_{IN} = \frac{M_{H2O} \times (H2 - H1)}{\eta_{\alpha}} = \frac{2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (193,89 - 167,57) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,85} = 89,2 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

Οπότε η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον ατμοστρόβιλο είναι:

$$W_{el} = 2718,0 - 89,2 = 2628,8 \text{ kWe} = 2,63 \text{ MWe}$$

Η απόδοση του ατμοστρόβιλου είναι: $\eta_{el} = 100 \times (2628,8/9380,5) = 28,0 \%$

ενώ η συνολική απόδοση της διεργασίας ηλεκτροπαραγωγής από την καύση βιομάζας είναι:

$$\eta_{total} = 100 \times (2628,8/10768,5) = 24,4 \%$$